

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication num r : 11-069884

(43)Date of publication of application : 09.03.1999

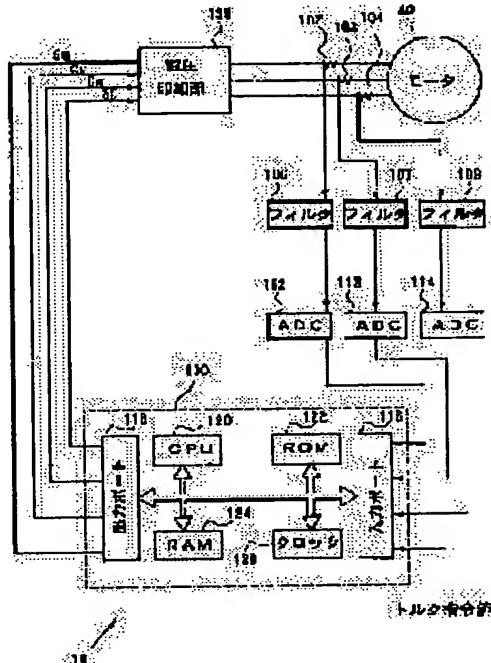
(51)Int.CI.

H02P 7/63

(21)Application number : 09-241980
(22)Date of filing : 21.08.1997(71)Applicant : TOYOTA MOTOR CORP
(72)Inventor : YAMADA EIJI
KAWABATA YASUMI**(54) ELECTRICAL ANGLE DETECTOR AND DESIGNING THEREOF****(57)Abstract:**

PROBLEM TO BE SOLVED: To attain detection of sensor-less electrical angle, by calculating the behavior of ideal current in switching with no dead time, between the mutual behavior of current where the behavior of current flowing through a prescribed phase of a coil winding according to the applied voltage of the coil winding of a motor is detected at a plurality of times of timing, and the behavior of ideal current, and computing an electrical angle.

SOLUTION: A voltage applying part 130 for applying voltage between respective coils in order to obtain respective phases of current of a motor 40 inputted separately is provided at an output part in a controlling ECU 100 equipped with a microprocessor CPU 120 for arithmetic operation. The control outputs Gu to Gw and SD from the CPU 120 are outputted in the voltage applying part 130, and the voltage applied to the coil of the motor can be controlled from the outside. The detection of current may be conducted by detecting its behavior three times or more at the completion of forward voltage application and reverse voltage application. It is thus possible to eliminate the dispersion of switching elements and the effect of temperature or secular change thereof, that is, the effect of dead time.



(51) Int.Cl.^a
H 02 P 7/63識別記号
3 0 3F I
H 02 P 7/63
3 0 3 V

審査請求 有 請求項の数 5 FD (全 17 頁)

(21) 出願番号 特願平9-241980

(22) 出願日 平成9年(1997)8月21日

(71) 出願人 000003207
 トヨタ自動車株式会社
 愛知県豊田市トヨタ町1番地

(72) 発明者 山田 英治
 愛知県豊田市トヨタ町1番地 トヨタ自動車株式会社内

(72) 発明者 川端 康己
 愛知県豊田市トヨタ町1番地 トヨタ自動車株式会社内

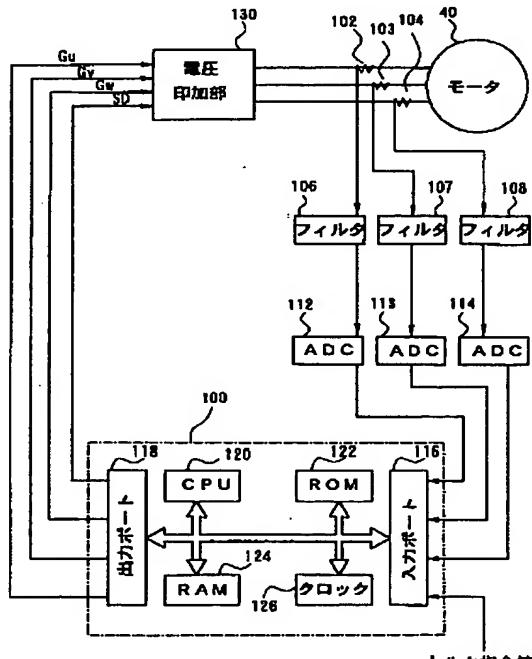
(74) 代理人 弁理士 下出 隆史 (外2名)

(54) 【発明の名称】 電気角検出装置およびその設計方法

(57) 【要約】

【課題】 インバータのデッドタイムによる影響を受けずに電気角を精度良く検出できる電気角検出装置を提供する。

【解決手段】 三相同期モータにおけるU相のコイル巻線に順方向および逆方向に順番に電圧を印加し、2回のタイミングで電流の変化量を検出する。この検出結果にはインバータのデッドタイムにより誤差が含まれる。これはインバータにおけるスイッチング1回当たりに生じる単位誤差の係数倍で表される。この関係に基づき、それぞれの電流の変化量の検出結果、上記誤差を含まない理想値、および単位誤差間に成立する関係式を用いて、誤差を含まない理想値を算出することができる。こうして求められた理想値を用いてインダクタンスを算出し、予め用意されたインダクタンスと電気角の関係を示すテーブルを参照することにより、デッドタイムの影響を受けずに電気角をセンサレスで検出する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 各相毎にソース側とシンク側とを一組として設けられたスイッチング素子のスイッチングにより生成された多相交流を巻線に流し、該巻線による磁界と永久磁石による磁界との相互作用により回転子を回転させる同期モータの電気角を検出する電気角検出装置であつて、
前記スイッチング素子のスイッチングを制御する制御信号を出力するスイッチング素子制御手段と、
該スイッチング素子制御手段による制御信号の出力に応じて、各相のソース側のスイッチング素子とシンク側のスイッチング素子の少なくとも一方がオフである条件下で該スイッチング素子をスイッチングするスイッチング素子駆動手段と、
該印加した電圧に応じて巻線の所定の相に流れる電流の挙動を、2回のタイミングで検出する電流検出手段と、
前記スイッチング素子駆動手段によるスイッチングがソース側がオンでシンク側がオフである状態とソース側がオフでシンク側がオンである状態との間でスイッチングが瞬時になされた場合に検出されるべき理想的な電流の挙動を、前記2回のタイミングで検出された電流の挙動の相互間に存在する所定の関係に基づいて算出する理想電流算出手段と、
該理想電流算出手段により算出された電流の挙動に基づいて、前記モータの電気角を演算する電気角演算手段とを備える電気角検出装置。

【請求項2】 請求項1記載の電気角検出装置であつて、

前記理想電流算出手段における前記所定の関係は、
前記2回のタイミングにおいてそれぞれ検出された第1の電流の挙動、第2の電流の挙動が各タイミングにおける理想的な電流の挙動に対して有する誤差 δ_1 、 δ_2 が、

電圧の印加パターンに応じて前記各検出タイミングについてそれぞれ予め特定される係数と、検出される電流の挙動がスイッチング素子のスイッチング1回当たりについて生じる電流の理想的な挙動に対して有する誤差である単位誤差との積で表される関係であり、

前記理想電流算出手段は、

前記第1の電流の挙動と前記第2の電流の挙動についての四則演算により、前記誤差 δ_1 と δ_2 とを相殺することによって前記理想的な電流の挙動を算出する手段である電気角検出装置。

【請求項3】 請求項2記載の電気角検出装置であつて、

前記電流検出手段が検出する電流の挙動は、前記所定の相に流れる電流の電流値であり、

前記理想電流算出手段は、

第1の検出タイミングにおいて検出された電流値 a_1 と、第2の検出タイミングにおいて検出された電流値 a_2

2とを用いて、

電圧の印加パターンに応じて予め特定される既知量である、

巻線への電圧の印加を開始すべき制御信号の出力から第1の検出タイミングまでに、前記所定の相のソース側のスイッチング素子をオンにする回数と、前記所定の相から他の相へ流れる順方向電流が流れている状態において前記所定の相以外の相のソース側のスイッチング素子をオフにする回数との総計である n と、

前記制御信号の出力から第2の検出タイミングまでに前記スイッチングが行われる回数の総計である m と、

第1の検出タイミングにおける電流の理想値 A_1 に応じて第2の検出タイミングにおける電流の理想値を与える関数 $F(A_1)$ とに基づいて表される

$$m \cdot a_1 - n \cdot a_2 = m \cdot A_1 - n \cdot F(A_1)$$

なる方程式またはこれと等価な式により、第1の検出タイミングにおける電流の理想値 A_1 を算出する手段であり、

前記電気角演算手段は、該理想値 A_1 に基づいて電気角を演算する電気角検出装置。

【請求項4】 請求項2記載の電気角検出装置であつて、

前記スイッチング素子制御手段は、所定の相を正電位とし他の相を負電位とする順方向電圧印加状態と、所定の相を負電位とし他の相を正電位とする逆方向電圧印加状態がそれぞれ時間 t_1 だけ生じるように前記制御信号を出力する手段であり、

前記電流検出手段は、所定の相に流れる電流について前記順方向電圧印加状態の前後の変化量 Δa_1 を検出し、

前記逆方向電圧印加状態の前後の変化量 Δa_2 を検出する手段であり、

前記理想電流算出手段は、

電圧の印加パターンに応じて予め特定される既知量である、

電流の変化量 Δa_1 を検出する期間において、前記所定の相のソース側のスイッチング素子をオンにする回数および前記所定の相以外の相のソース側のスイッチング素子をオフにする回数の総計 n と、

電流の変化量 Δa_2 を検出する期間において、該スイッチングが行われる回数の総計 k とに基づいて表される

$$\Delta A_1 = (k \cdot \Delta a_1 - n \cdot \Delta a_2) / (k + n)$$

なる方程式またはこれと等価な式により前記順方向電圧印加状態の前後の電流の変化量の理想値 ΔA_1 を算出する手段であり、

前記電気角演算手段は、該電流の変化量 ΔA_1 に基づいて電気角を演算する電気角検出装置。

【請求項5】 同期モータの巻線の各相毎にソース側とシンク側とを一組として設けられたスイッチング素子のスイッチングにより、該モータの巻線の所定の相に電圧

を印加し、該印加した電圧に応じて該所定の相に流れる電流の挙動を用いて、該同期モータの電気角を検出する電気角検出装置の設計方法であつて、

印加した電圧に応じて巻線の所定の相に流れる電流の挙動を検出する2回のタイミングを設定し、

各タイミングにおいて検出された電流の挙動が該タイミングにおける理想的な電流の挙動に対して有する誤差を、電圧の印加パターンに応じて予め特定される係数と、検出される電流の挙動がスイッチング素子のスイッチング1回当たりについて生じる電流の理想的な挙動に対して有する誤差である単位誤差との積で表す数式を求め、

各タイミングにおける理想的な電流の挙動の相関を示す数式を求め、

上記数式を連立方程式として解くことにより、前記検出された電流の挙動から理想的な電流の挙動を算出する理想電流算出式を求め、

該理想電流算出式により算出された電流の挙動を、前記モータの電気角の検出に用いられる前記電流の挙動とする、同期モータの電気角検出装置の設計方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、同期モータにおける電気角を検出する検出装置およびその設計方法に関し、詳しくは回転子の回転位置の検出に専用のセンサを用いない、いわゆるセンサレスで電気角を検出する技術に関する。

【0002】

【従来の技術】多相交流を巻線に流し、該巻線による磁界と永久磁石による磁界との相互作用により回転子を回転させる同期モータで、所望の回転トルクを得るために、回転子の位置、即ち電気角に応じて巻線に流す多相交流を制御する必要がある。従来、センサレスで回転子の電気角を検出する方法としては、巻線間に高周波電圧を加え、巻線間の電圧波形から回転子電気角を検出する装置が提案されている。これは、永久磁石を用いた同期モータの場合、回転子の回転により巻線間に逆起電力が生じることを利用したものである。一方、この装置は、回転子が停止中や低回転中には、上記起電力は生じたとしても非常に微少であるため、精度よく電気角を検出することはできなかった。

【0003】このような課題に鑑み、出願人は、回転子が停止中または低回転中においても、精度良く回転子の電気角を検出する装置を提案している(特開平7-177788)。これは、モータの巻線間に電圧を印加し、該印加された電圧に応じて流れる電流の挙動を検出することにより、電気角を検出するものである。

【0004】具体的に、電気角を検出する装置の一例を示せば次の通りである。回転子角度に応じて磁気回路中の磁気抵抗が変化する、いわゆる突極型の永久磁石型モ

ータの場合、回転子の電気角によって巻線のインダクタンスが変化し、巻線に電圧を印加した場合の電流の挙動が変化する。例えば、図6に示す通り、インダクタンスが大きい程、電圧印加後、所定時間経過した時点での電流値は小さくなる。両者の間には、理論的に求められる関係が存在する。本出願人が提案していた上記電気角検出装置は、かかる性質に着眼してなされたものであり、インダクタンスと電気角との関係を予めテーブルとして記憶しておき、検出された電流の挙動から算出されたインダクタンスに基づいて該テーブルを参照することによって電気角を求めるものである。上記検出装置において電気角の検出を精度良く行うためには、印加した電圧と該電圧に応じて流れる電流の挙動との関係を正確に把握する必要がある。

【0005】一方、同期モータの各巻線に電圧を印加する方法としては、各相毎にソース側とシンク側とを一組にして設けられたスイッチング素子による駆動回路、いわゆるインバータのスイッチングを制御して擬似的な多相交流を印加する方法が採られる。インバータでは、各相のソース側とシンク側のスイッチング素子が同時にオンとなり回路が短絡するのを回避するため、通常、双方のスイッチング素子がオフとなる状態を挟んでスイッチングを行っている。従って、あるタイミングであるスイッチング素子をオンにする制御信号をインバータに出力した場合、実際に該スイッチング素子がオンになるまでには、いわゆるデッドタイムと呼ばれる時間遅れが生じる。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】しかし、上記デッドタイムが生じている場合には、インバータに出力した制御信号からモータ巻線にかかる電圧を正確に把握することが困難である。この結果、コイル巻線に印加した電圧に応じて流れる電流の挙動に基づいてインダクタンスを算出する方法では、インダクタンスを正確に算出することができず、電気角の検出に誤差を生じていた。電気角の検出誤差は、モータトルクおよび効率の低下を招き、また不規則なトルク変動や振動を生じる等の弊害を生じるおそれもあった。

【0007】通常、インバータを用いた種々の機器においては、デッドタイムによる影響を抑制して所望のタイミングで電圧がモータ巻線に印加されるように、デッドタイム分だけインバータへの出力信号を時間的に早める、いわゆるデッドタイム補正が採られている。また、上記電気角検出装置においては、デッドタイムがない場合に印加されるべき電圧に対して、デッドタイムを考慮した補正を加えることにより現実にモータ巻線に印加されている電圧を求める補正を探ることも考えられていた。しかし、デッドタイムはスイッチング素子に応じてバラツキがあるため、これらの補正によりその影響を除去しようとすれば、インバータ毎に個別の補正が必要と

なり、該補正を行うことは現実的には非常に困難であつた。更に、デッドタイムはインバータの温度や経年変化等によっても変化するため、これらの補正によりデッドタイムの影響を除去する方法では、電気角の検出誤差を実用的な範囲に抑えることが困難であった。

【0008】本発明は上記課題を解決するためになされ、電流の挙動に基づいて電気角を検出する電気角検出装置において、上記デッドタイムの影響を受けずに電気角を検出できる技術を提供することを目的とする。

【0009】

【課題を解決するための手段およびその作用・効果】上記課題の少なくとも一部を解決するために、本発明では次の構成を採った。本発明の第1の電気角検出装置は、各相毎にソース側とシンク側とを一組として設けられたスイッチング素子のスイッチングにより生成された多相交流を巻線に流し、該巻線による磁界と永久磁石による磁界との相互作用により回転子を回転させる同期モータの電気角を検出する電気角検出装置であって、前記スイッチング素子のスイッチングを制御する制御信号を出力するスイッチング素子制御手段と、該スイッチング素子制御手段による制御信号の出力に応じて、各相のソース側のスイッチング素子とシンク側のスイッチング素子の少なくとも一方がオフである条件下で該スイッチング素子をスイッチングするスイッチング素子駆動手段と、該印加した電圧に応じて巻線の所定の相に流れる電流の挙動を、2回のタイミングで検出する電流検出手段と、前記スイッチング素子駆動手段によるスイッチングがソース側がオンでシンク側がオフである状態とソース側がオフでシンク側がオンである状態との間でスイッチングが瞬時になされた場合に検出されるべき理想的な電流の挙動を、前記2回のタイミングで検出された電流の挙動の相互間に存在する所定の関係に基づいて算出する理想電流算出手段と、該理想電流算出手段により算出された電流の挙動に基づいて、前記モータの電気角を演算する電気角演算手段とを備えることを要旨とする。

【0010】ここで、スイッチングがソース側がオンでシンク側がオフである状態とソース側がオフでシンク側がオンである状態との間でスイッチングが瞬時になされた場合は、ソース側がオンでシンク側がオフである第1の状態からソース側がオフでシンク側がオンである第2の状態へのスイッチングおよび第2の状態から第1の状態へのスイッチングがそれぞれ瞬時になされた理想的な場合を意味する。また、瞬時とは文字通りスイッチングに要する時間が値0であることを意味する。上記スイッチング素子駆動手段はスイッチングの遅れ等を考慮して前記第1の状態と第2の状態の間にソース側、シンク側の双方がオフとなる第3の状態を挟んでスイッチングを行っているが、スイッチングが瞬時になされた理想的な場合には、かかる第3の状態を挟まずにスイッチング

がなされることになる。

【0011】かかる構成の電気角検出装置は、モータのコイル巻線に印加した電圧に応じて巻線の所定の挙動を2回のタイミングで検出する。このように検出された電流の挙動の相互間および理想的な電流の挙動との間にには、一般に所定の関係が成立する。上記構成による電気角検出装置における理想電流算出手段は、かかる関係に基づき、いわゆるデッドタイムなしでスイッチングがなされた場合の理想的な電流の挙動を算出することができる。従って、上記構成の電気角検出装置によれば、いわゆるデッドタイムの影響を除去することができ、電気角を精度よく検出することができる。

【0012】2回のタイミングで検出された上記電流の挙動には、理想的な電流の挙動に対する誤差が含まれている。この誤差は、スイッチング素子のバラツキおよびその温度や経年変化等に応じて変化するが、検出された電流の挙動に存在する所定の関係は、一般にこれらの影響を受けないものである。従って、上記構成の電気角検出装置によれば、スイッチング素子のバラツキおよびその温度や経年変化等の影響を受けることなく、いわゆるデッドタイムの影響を除去することができる。

【0013】なお、電圧の印加は、最初に、所定の相の電位をプラスとし他の相をマイナスとする順方向電圧を所定期間印加し、その後所定の相の電位をマイナスとし他の相をプラスとする逆方向電圧を印加するものとしてもよいし、順方向電圧のみを印加するものとしてもよい。また、順方向電圧印加中または逆方向電圧印加中にそれぞれ平均電圧を制御するためのパルスを加えるものとしてもよい。

【0014】この場合における電流の検出は、順方向電圧の印加が終了したときおよび逆方向電圧の印加が終了した時に進行することが望ましいが、この他順方向電圧印加中および逆方向電圧印加名中にそれぞれ1回行うものとしてもよいし、順方向電圧印加中または逆方向電圧印加中に2回行うものとしてもよい。また、厳密にこれらの電圧が印加されている期間内でなくともよく、電圧印加が終了した後、電流が減衰していない期間に電流を検出するものとしてもよい。但し、実質的に電圧が印加されておらず、電流の挙動が変化しないような期間内において2回検出しても無意味であることは当然である。

【0015】上記発明においては、電流の挙動を2回のタイミングで検出するものとしているが、3回以上電流を検出するものとしてもよい。この場合に、検出された電流値に応じて、検出精度がよいと思われる2つの検出結果を電気角の算出に用いるものとすれば、電気角の検出精度を更に向上することができる。また、3回以上検出された電流の挙動の中から2つの電流の挙動を1組として複数組選択し、各組について電気角を求め、それらの平均をとるものとしてもよい。

【0016】ここで、上記電気角検出装置において、前

記理想電流算出手段における前記所定の関係は、前記2回のタイミングにおいてそれぞれ検出された第1の電流の挙動、第2の電流の挙動が各タイミングにおける理想的な電流の挙動に対して有する誤差 δ_1 、 δ_2 が、電圧の印加パターンに応じて前記各検出タイミングについてそれぞれ予め特定される係数と、検出される電流の挙動がスイッチング素子のスイッチング1回当たりについて生じる電流の理想的な挙動に対して有する誤差である単位誤差との積で表される関係であり、前記理想電流算出手段は、前記第1の電流の挙動と前記第2の電流の挙動についての四則演算により、前記誤差 δ_1 と δ_2 とを相殺することによって前記理想的な電流の挙動を算出する手段とすることが望ましい。

【0017】一般に、上記誤差 δ_1 および誤差 δ_2 は、スイッチング素子のスイッチング1回当たりについて生じる電流の理想的な挙動と検出される電流の挙動との誤差を単位誤差と呼ぶとすれば、該単位誤差と所定の係数との積で表すことができる。しかも、この所定の係数は、コイル巻線に印加する電圧の印加パターンに応じて予め特定することができる。かかる関係に基づいて、上記構成の電気角検出装置は、第1の電流の挙動と前記第2の電流の挙動についての四則演算により、前記誤差 δ_1 と δ_2 とを相殺することによって前記理想的な電流の挙動を算出する。この結果、いわゆるデッドタイムの影響を除去することができ、電気角を精度よく検出することができる。また、比較的単純な演算である四則演算によりデッドタイムの影響を除去することができるため、短時間で処理することが可能である。

【0018】また、この場合において、前記電流検出手段が検出する電流の挙動は、前記所定の相に流れる電流の電流値であり、前記理想電流算出手段は、第1の検出タイミングにおいて検出された電流値 a_1 と、第2の検出タイミングにおいて検出された電流値 a_2 とを用いて、電圧の印加パターンに応じて予め特定される既知量である、巻線への電圧の印加を開始すべき制御信号の出力から第1の検出タイミングまでに、前記所定の相のソース側のスイッチング素子をオンにする回数と、前記所定の相から他の相へ流れる順方向電流が流れている状態において前記所定の相以外の相のソース側のスイッチング素子をオフにする回数との総計である n と、前記制御信号の出力から第2の検出タイミングまでに前記スイッチングが行われる回数の総計である m と、第1の検出タイミングにおける電流の理想値 A_1 に応じて第2の検出タイミングにおける電流の理想値を与える関数 $F(A_1)$ とに基づいて表される

$$m \cdot a_1 - n \cdot a_2 = m \cdot A_1 - n \cdot F(A_1)$$

なる方程式またはこれと等価な式により、第1の検出タイミングにおける電流の理想値 A_1 を算出する手段であり、前記電気角演算手段は、該理想値 A_1 に基づいて電気角を演算することを要旨とすることもできる。

【0019】かかる構成による電気角検出装置では、電圧パルスを印加するための所定のスイッチング回数 n 、 m に応じて定められる上記方程式またはこれと等価な式により電流の理想値を算出する。この結果、デッドタイムの影響を除去して電気角を精度よく検出することができる。また、電流の理想値を与える式は、上述の通り、所定のスイッチング回数に応じて定められる比較的単純なものである。従って、電気角を検出時に印加する電圧をモータの運転状態等に応じて変化させる必要がある場合でも比較的容易にデッドタイムの影響を除去することができる。

【0020】なお、第1の検出タイミングにおける電流の理想値 A_1 に応じて第2の検出タイミングにおける電流の理想値を与える関数 $F(A_1)$ は、電流を検出する第1および第2のタイミングに応じて、種々定め得るものである。例えば、電圧の印加パターンを、最初に所定期間、所定の相の電位をプラスとし、他の相をマイナスとする順方向電圧を印加し、その後所定の相の電位をマイナスとし、他の相をプラスとする逆方向電圧を印加するものとした場合の関数 $F(A_1)$ は、次の通りである。第1の検出タイミングを順方向電圧印加を終了した時とし、第2の検出タイミングを逆方向電圧印加を終了した時とすると、

$$\text{関数 } F(A_1) = A_1 - V \cdot t_2 / L$$

となる。ここで、 V は印加される電圧値であり、 t_2 は逆方向電圧が印加されている時間であり、 L はコイル巻線のインダクタンスである。また、第1の検出タイミングを順方向電圧の印加中とし、第2の検出タイミングを順方向電圧の印加を終了した時とすると、

$$\text{関数 } F(A_1) = A_1 + V \cdot t_2 / L$$

となる。

【0021】なお、順方向電圧の印加が開始されてから第1の検出タイミングまでの間に順方向電圧が印加されている時間を t_1 とすれば、 $A_1 = V \cdot t_1 / L$ なる関係があるから、上記関数 $F(A_1)$ から V 、 L を消去した形としてもよい。また、第2の検出タイミングを、そこでの電流の理想値が値0となるように選択し、関数 $F(A_1) = 0$ としてもよい。

【0022】さらに、具体的には、前記スイッチング素子制御手段は、所定の相を正電位とし他の相を負電位とする順方向電圧印加状態と、所定の相を負電位とし他の相を正電位とする逆方向電圧印加状態がそれぞれ時間 t_1 だけ生じるように前記制御信号を出力する手段であり、前記電流検出手段は、所定の相に流れる電流について前記順方向電圧印加状態の前後の変化量 Δa_1 を検出し、前記逆方向電圧印加状態の前後の変化量 Δa_2 を検出する手段であり、前記理想電流算出手段は、電圧の印加パターンに応じて予め特定される既知量である、電流の変化量 Δa_1 を検出する期間において、前記所定の相のソース側のスイッチング素子をオンにする回数および

前記所定の相以外の相のソース側のスイッチング素子をオフにする回数の総計 n と、電流の変化量 Δa_2 を検出する期間において、該スイッチングが行われる回数の総計 k とに基づいて表される

$$\Delta A_1 = (k \cdot \Delta a_1 - n \cdot \Delta a_2) / (k + n)$$

なる数式またはこれと等価な数式により前記順方向電圧印加状態の前後の電流の変化量の理想値 ΔA_1 を算出する手段であり、前記電気角演算手段は、該電流の変化量 ΔA_1 に基づいて電気角を演算するものとすることも可能である。

【0023】かかる構成からなる電気角検出装置は、上式またはこれと等価な数式に検出された電流変化量 Δa_1 、 Δa_2 を代入することにより、順方向電圧印加状態の前後の電流の変化量の理想値 ΔA_1 を算出することができ、 ΔA_1 の値に基づいて電気角を演算することができる。この結果、デッドタイムの影響を除去して電気角を精度良く検出することができる。また、この構成からなる電気角検出装置によれば、電流の変化量に基づいて電気角を検出しているため、初期電流が値0でないシフトした状態にあっても、電気角を精度よく検出することができる。

【0024】一方、本発明の電気角検出装置の設計方法は、同期モータの巻線の各相毎にソース側とシンク側とを一組として設けられたスイッチング素子のスイッチングにより、該モータの巻線の所定の相に電圧を印加し、該印加した電圧に応じて該所定の相に流れる電流の挙動を用いて、該同期モータの電気角を検出する電気角検出装置の設計方法であって、印加した電圧に応じて巻線の所定の相に流れる電流の挙動を検出する2回のタイミングを設定し、各タイミングにおいて検出された電流の挙動が該タイミングにおける理想的な電流の挙動に対して有する誤差を、電圧の印加パターンに応じて予め特定される係数と、検出される電流の挙動がスイッチング素子のスイッチング1回当たりについて生じる電流の理想的な挙動に対して有する誤差である単位誤差との積で表す数式を求め、各タイミングにおける理想的な電流の挙動の相関を示す数式を求め、上記数式を連立方程式として解くことにより、前記検出された電流の挙動から理想的な電流の挙動を算出する理想電流算出式を求め、該理想電流算出式により算出された電流の挙動を、前記モータの電気角の検出に用いられる前記電流の挙動とすることを要旨とする。

【0025】先に述べた通り、電気角検出装置における電気角の検出精度を向上するためには、デッドタイムの影響を除去する必要があるが、この影響は、検出した電流の挙動に基づく比較的単純な数式により除去することができる。上記設計方法では、デッドタイムの影響がない理想的な電流の挙動と実際に検出される電流の挙動との間の誤差が、所定の単位誤差の関数で表されることに鑑み、これらを該単位誤差を用いて表す。また、各検出

タイミング間に存在する相関を示す数式を求める。こうすることにより、各検出タイミングにおける理想値と単位誤差を未知数とする連立方程式をたてることができため、その理想値を求めることができる。こうして求められる理想電流算出式を用いれば、検出された電流の挙動からデッドタイムの影響を除去可能な電気角検出装置を設計することができる。なお、上記連立方程式をインダクタンスを未知数として含むものとすることにより、理想電流算出式を求めるまでなくインダクタンスを直接求めるものとし、該算出結果を用いて電気角を算出するものとしてもよい。

【0026】

【発明の実施の形態】

(1) 実施例の構成

以下、本発明の実施の形態について、実施例を用いて説明する。図1は、本発明の一実施例としての電気角検出装置を含むモータ制御装置10の概略構成を示すブロック図、図2は制御対象となっている三相同期モータ40の概略構成を示す説明図、図3はこの三相同期モータ40の固定子30と回転子50との関係を示す端面図である。

【0027】まず、図2を用いて、三相同期モータ40の全体構造について説明する。この三相同期モータ40は、固定子30と回転子50とこれらを収納するケース60とからなる。回転子50は、外周に永久磁石51ないし54が貼付されており、その軸中心に設けられた回転軸55を、ケース60に設けられた軸受61、62により回転自在に軸支している。

【0028】回転子50は、無方向性電磁鋼板を打ち抜いて成形した板状回転子57を複数枚積層したものである。この板状回転子57は、図3に示すように、直交する位置に4箇所の突極71ないし74を備える。板状回転子57を積層した後、回転軸55を圧入し、積層した板状回転子57を仮止めする。この電磁鋼板を素材とする板状回転子57は、その表面に絶縁層と接着層が形成されており、積層後所定温度に加熱され、接着層が溶融することにより、固定される。

【0029】こうして回転子50を形成した後、回転子50の外周面であって、突極71ないし74の中間位置に、永久磁石51ないし54を軸方向に亘って貼付する。永久磁石51ないし54は、回転子50の半径方向に磁化されており、その極性は隣り合う磁石同士が互いに異なる磁極となっている。例えば、永久磁石51は外周面がN極であり、その隣の永久磁石52は外周面がS極となっている。この永久磁石51、52は、回転子50を固定子30に組み付けた状態では、板状回転子57および板状固定子20を貫く磁路Mdを形成する(図3破線参照)。

【0030】固定子30を構成する板状固定子20は、板状回転子57と同じく無方向性電磁鋼板の薄板を打ち

抜くことで形成されており、図3に示すように、計12個のティース22を備える。ティース22間に形成されたスロット24には、固定子30に回転磁界を発生させるコイル32が巻回されている。尚、板状固定子20の外縁部には、固定用のボルト34を通すボルト孔が設けられているが、図3では図示を省略してある。

【0031】固定子30は、板状の板状固定子20を積層し互いに押圧した状態として、接着層を加熱・溶融することで一応固定される。この状態で、コイル32をティース22に巻回して固定子30を完成した後、これをケース60に組み付け、ボルト孔に固定用のボルト34を通して、これを締め付けて全体を固定する。更に回転子50をケース60の軸受61、62により回転自在に組み付けることにより、この三相同期モータ40は完成する。

【0032】固定子30のコイル32に回転磁界を発生するよう励磁電流を流すと、図3に示すように、隣接する突極および板状回転子57、板状固定子20を貫く磁路Mqが形成される。尚、上述した永久磁石51により形成される磁束が回転子50を径方向に貫く軸をd軸と呼び、固定子30のコイル32により形成される磁束が回転子50を径方向に貫く軸をq軸と呼ぶ。また、d軸が電気的にq軸に対してなす角を電気角と呼ぶ。図4に本実施例の三相同期モータの等価回路を示す。図4に示す通り、電気角は等価回路におけるU相コイルと磁極の角度に相当する。

【0033】次に、図1に従ってモータ制御装置10の構成について説明する。モータ制御装置10は、外部からのトルク指令を受けて三相同期モータ40の三相

(U、V、W相)のモータ電流を制御する制御用ECU100、三相同期モータ40のU相電流Au、V相電流Av、W相電流Awを検出する電流センサ102、103、104、検出された電流の高周波ノイズを除去するフィルタ106、107、108、検出した電流値をデジタルデータに変換する3個のアナログデジタル変換器(ADC)112、113、114から構成されている。

【0034】制御用ECU100の内部には、図示するように、算術論理演算を行うマイクロプロセッサ(CPU)120、このCPU120が行う処理や必要なデータを予め記憶したROM122、処理に必要なデータ等を一時的に読み書きするRAM124、計時を行うクロック126等が設けられており、バスにより相互に接続されている。このバスには、入力ポート116や出力ポート118も接続されており、CPU120は、これらのポート116、118を介して、三相同期モータ40のU、V、Wの各相に流れる電流Au、Av、Awを読み込むことができる。

【0035】また、制御用ECU100には、別途入力されるトルク指令に基づいて決定されたモータの各相電

流Au、Av、Awが得られるようモータの各コイル間に電圧を印加する電圧印加部130が、その出力部に設けられている。CPU120からの制御出力Gu、Gv、Gw、SDが、この電圧印加部130に出力されており、三相同期モータ40の各コイルに印加される電圧を外部から制御することが可能となっている。電圧印加部130の詳細な構成を図5に基づいて説明する。

【0036】電圧印加部130は、大きくはトランジスタインバータ138、ソース側プリドライブ回路132、シンク側プリドライブ回路134およびインタフェース部136から構成されている。トランジスタインバータ138においては、U、V、Wの各相ごとに主電源のソース側およびシンク側に2つのトランジスタが一組にして接続されており(図5のTu+, Tu-, Tv+, Tv-, Tw+, Tw-)、各トランジスタにはフライホイールダイオードがそれぞれ設けられている(図5のDu+, Du-, Dv+, Dv-, Dw+, Dw-)。ソース側プリドライブ回路132は、トランジスタインバータ138においてソース側のトランジスタ(Tu+, Tv+, Tw+)にゲート信号を入力するための回路であり、U、V、Wの各相ごとにトランジスタインバータ駆動用電源(+V, -V)のソース側とシンク側にそれぞれ接続された2つのトランジスタにより構成されている。シンク側プリドライブ回路134の構成も同様である。また、ソース側プリドライブ回路132およびシンク側プリドライブ回路134には、制御用ECU100からの制御信号Gu、Gv、Gwを両者に分配して伝達するインタフェース部136が接続されている。

【0037】インタフェース部136の構成を、U相を例に説明する。制御用ECU100からの信号線は、ディレイ回路D1y+およびアンドゲートAg+を介してソース側プリドライブ回路132に接続されている。また、上記ディレイ回路D1y+に至るまでに分岐され、インバータInv、ディレイ回路D1y-およびアンドゲートAg-を介してシンク側プリドライブ回路134にも接続されている。なお、上記ディレイ回路D1y+, D1y-は、入力される電圧がハイからローに変わるとときには時間遅れなく信号を出力し、ローからハイに変わるとときには所定の時間(以下、デッドタイムと呼ぶ)だけ遅れて信号を出力する特性を有しているものである。

【0038】上記アンドゲートAg+, Ag-の他方の入力には、全出力を瞬時にオフとするためのシャットダウン信号(ロー・アクティブな信号である)を伝達する線も接続されている。シャットダウン信号は、V、W相に接続される各アンドゲートの一方にも、同様に入力される。シャットダウン信号(SD)がローである場合には、これらのアンドゲートの出力はすべてローとなるため、トランジスタインバータ138の全てのゲート信号

がローとなり、モータ40には、一切電圧が印加されない状態となる。シャットダウン信号は通常ハイに維持されているため、制御用ECU100から電圧印加部130に出力された信号GU、GV、GWに応じて各アンドゲートの出力は決まる。以下、シャットダウン信号SDはハイが出力されているものとして説明を進める。

【0039】インタフェース部136の機能を説明する。制御用ECU100が、U相の信号をローからハイに切り替えた場合、ソース側プリドライブ回路132のアンドゲートAg+にはディレイ回路D1y+によりデッドタイム分だけ遅れて信号が outputされ、その結果ソース側プリドライブ回路132にデッドタイム分だけ遅れてハイの信号が出力される。従って、U相に上記信号が入力されてからデッドタイム分だけ経過した後に、トランジスタインバータ138のソース側のトランジスタTu+はオン状態となる。一方、シンク側プリドライブ回路134には、上記信号はインバータInvで逆転して伝達される。つまり、ディレイ回路D1y-にはハイからローに切り替わる信号が入力される。ディレイ回路は先に述べた特性を有しているため、この場合は時間遅れなく該信号をアンドゲートAg-に出力する。従って、シンク側プリドライブ回路134には制御用ECU100からの信号入力とほぼ同時にローの信号が出力され、トランジスタインバータ138のシンク側のトランジスタTu-はオフ状態となる。

【0040】逆にU相の信号GUをハイからローに切り替えた場合には、その信号の入力とほぼ同時にトランジスタインバータ138のソース側のトランジスタTu+がオフ状態となり、デッドタイム分だけ遅れてシンク側のトランジスタTu-がオン状態となる。インタフェース回路136は、上述のように、デッドタイムを設けることにより、トランジスタインバータ138のソース側

$$A_u(t_1) = \{1 - \exp(-R \cdot t_1 / L)\} E_1 / R \quad \dots \quad (1)$$

ここで、expは、指数関数を示し、Rは回路のインピーダンスを、t1は電圧印加後の経過時間を示す。また、L/Rをモータの時定数Tmという。

【0044】式(1)によれば、電流の応答は厳密には曲線状の変化を示すが、本実施例の電圧印加時間は、モータ時定数Tmに比して十分小さいため、本実施例においては、電流変化は図6に示す通り直線で近似して取り扱うことができる。つまり、t1がモータ時定数Tmよりも十分小さいという条件下で上式(1)をテーラー展開することにより、上式(1)は次式(2)の形で扱うことができる。

$$A_u(t_1) = E_1 \cdot t_1 / L \quad \dots \quad (2)$$

【0045】式(1)または式(2)より、電圧印加時の電流Au(t1)の挙動がインダクタンスLに応じて変化することが分かる。インダクタンスが小さい場合には、図6に示す通り、電圧印加期間終了時点でモータ電流は電流値Im1まで立ち上がる。これに対し、インダ

トランジスタTu+およびシンク側トランジスタTu-が同時にオン状態にならないようにしているのである。V、W相についても同様である。

【0041】以上に示したモータ制御装置10の構成の内、電流センサ102~104、フィルタ106~108、ADC112~114、電圧印加部130および制御用ECU100が本発明にいう電気角検出装置に相当する。

【0042】(2) 電気角検出の原理

次に、かかる構成の三相同期モータ40およびこれを制御するモータ制御装置10において、回転子50の電気角を検出する原理について説明する。図4に示した三相同期モータ40の等価回路図のU相とVW相間に所定の電圧E1をステップ関数的に加えた場合、ここに流れる電流Auは、回路のインダクタンス成分Lにより定まる過渡応答を示す。電圧E1はU相がプラス状態であり他の相がマイナス状態となる方向に印加されている（これを順方向電圧と呼ぶ）。電圧E1を印加した際の過渡応答の一例を示したのが、図6のグラフである。なお、回路のインダクタンスLは、その時の回転子50の電気角θの関数となっている。即ち、回転子50が回転していない状態（静止状態）にあるとすれば、この回転子50のd軸が電気的にq軸に対してなす角（電気角）により、回路のインダクタンスLは定まる。本実施例では、回路のインダクタンスLと電気角について、実測により得られた関係がテーブル形式でROM122に記憶されている。

【0043】図4に示す等価回路において流れる電流（以下、U相電流と呼ぶ）Au(t1)は、電圧印加中、即ち図6の区間D1においては次式(1)の応答を示す。

$$A_u(t_1) = \{1 - \exp(-R \cdot t_1 / L)\} E_1 / R \quad \dots \quad (1)$$

クタンスが大きい場合には、図6に示す通り、電流値Im1よりも小さい電流値Im2までしか立ち上がらない。

【0046】本実施例では、かかる特性に鑑み、電圧印加終了時にモータ巻線に流れている電流を検出する。次にこの電流値およびその他既知の諸量を式(1)または式(2)に代入することにより、インダクタンスLを算出する。前述の通り、ROM122には、テーブル形式でインダクタンスLと電気角の関係が記憶されているため、本実施例の電気角検出装置は、算出されたインダクタンスLに基づいてこのテーブルを参照することにより、電気角を求める。なお、上述の説明では、インダクタンスの検出を電圧印加終了時の電流値Im1、Im2に基づいて行うものとしているが、その他電流値Auが所定の値に達するまでに要する時間を用いるものとしてもよいし、電圧印加中（図6の区間D1）における電流の変化率を用いるものとしてもよい。なお、上述の関係

式を用いるためには、回路に現実に電圧が印加された時間および電圧値が既知である必要がある。

【0047】本実施例では、電気角の検出精度を高めるため、順方向電圧を印加して電流の挙動を検出した後、その逆方向の電圧、即ちU相をマイナス状態としV, W相をプラス状態とする電圧（以下、逆方向電圧と呼ぶ）を印加して電流の挙動を検出している。図7に本実施例における電圧の印加の様子を示す。

【0048】図7のGu, Gv, Gwは、U, V, W相について制御用ECU100から電圧印加部130に出力される信号を表している。また、Gu+はインタフェース部136のアンドゲートAg+の出力、即ちトランジスタインバータ138のU相のソース側トランジスタTu+のゲート信号を表し、Gu-はインタフェース部136のアンドゲートAg-の出力、即ちトランジスタインバータ138のU相のシンク側トランジスタTu-のゲート信号を表している。同様に、Gv+, Gw+はV, W相のソース側トランジスタTu+, Tw+のゲート信号を表し、Gv-, Gw-はV, W相のシンク側トランジスタTu-, Tw-のゲート信号を表している。Vu, Vv, Vwは各トランジスタのスイッチングの結果生じるU, V, W相の電位を示している。U相電流は、U相からV, W相に流れる方向を正方向として、モータ40のコイル巻線に流れる電流の様子を示したものである。

【0049】最初に、理解の容易のため、先に説明したデッドタイムがない場合について説明する。これは、図5においてディレイ回路D1y+, D1y-が存在しない場合に該当し、トランジスタインバータ138の各トランジスタは、制御用ECU100からの出力信号Gu, Gv, Gwに合わせて瞬時にオン・オフが切り替わる仮想的な場合に相当する。

【0050】制御用ECU100からGuをハイにする信号が出力されると（図7の領域b）、その瞬間にU相のソース側トランジスタTu+がオンとなり、シンク側トランジスタTu-がオフとなるため、図7のVuチャートに示す通り、U相の電位がハイとなる。このとき、V, W相の電位はローであるため、コイル巻線には順方向電圧が印加されることになり、図7のU相電流のグラフに点線で示した通りU相電流が流れはじめる。図7の領域cにおいても同様の状態が維持される。

【0051】次に、制御用ECU100からGv, Gwをハイにする信号が出力されると（図7の領域d, e）、V, W相のソース側のトランジスタTw+, Tw+がオンとなる結果、V, W相の電位がハイとなる。従って、U相との電位差がなくなるが、よく知られている通り、モータ40のコイル32にはこのとき電流を維持しようとする、いわゆる誘導起電力が生じるため、U相電流はそのまま維持される。厳密には、U相電流は徐々に減衰していくが、領域d, eは非常に短期間であるた

め、電流の減衰量は無視できる。

【0052】Gu, Gwにローの信号が入力されると（領域f, g）、その瞬間に領域b, cと同様、順方向電圧が印加された状態となるため、U相電流値は再び上昇する。その後、Guにローの信号が入力されると（領域h）、U相の電位が下がり、V, W相との電位差がない状態となる。この場合も、領域d, eと同様、誘導起電力によって、U相電流は維持される。

【0053】次に逆方向電圧を印加した場合について説明する。領域jにおいて、Gv, Gwにハイの信号が入力されると、モータ40には逆方向電圧が印加される。従って、それまで維持されていたU相電流は減少していく。但し、電流値が正であるため、U相からV, W相に電流が流れていることに変わりはない。このとき、U相のソース側トランジスタTu+はオフとなっており、電流が流れないため、シンク側トランジスタTu-に並列に設けられたフライホイールダイオードDu-を経由して主電源のシンク側から電流が流れ出す（図5の回路図参照）。同様にV, W相もソース側のトランジスタTv+, Tw+に並列に設けられたフライホイールダイオード(Dv+, Dw+)を経由して主電源のソース側に電流が流れ込む。

【0054】次に、Guにハイの信号が出力されると（領域l, m）、誘導起電力によりU相電流が維持され、Guにローの信号が入力されると（領域n, o）U相電流は再び減少する。そして、Gv, Gwにローの信号が入力された時点（領域p）で電流値は値0に戻る。以上がデッドタイムがない場合の電圧および電流の様子であり、領域hにおいて電流値を測定すれば、電圧が印加された時間（領域b, c, f, gに相当する時間）および電圧値が既知であるため、先に述べた方法によりモータ40のインダクタンスを算出することができる。

【0055】なお、順方向電圧の印加中にGv, Gwにハイの信号を出力しているのは（領域d, e）、コイル巻線に印加される電圧の平均値を制御するためである。従って、印加する電圧値および時間に応じて、上記信号の出力を削除したり、回数を増やしたりしてもよい。

【0056】以上が、本実施例における電気角検出の原理であり、本出願人が先行技術（特開平7-177788）において開示した検出原理と同じものである。デッドタイムの影響がない場合には、上記原理に基づいて電気角を精度よく検出することができる。次に、本実施例に特徴的な部分であるデッドタイムの影響を除去する処理を含めて、電気角を検出する電気角検出装置およびその設計方法について説明する。

【0057】(3) 電流値に対するデッドタイムの影響
本実施例における具体的な処理方法を説明する前に、デッドタイムの影響について図7を用いて説明する。デッドタイムがある場合の電流の様子を図7のU相電流のグラフ中に実線で示す。Guにハイの信号が出力されると

(領域b)、U相のシンク側トランジスタ T_{u-} はその瞬間にオフとなるが(図7の G_{u-})、ソース側トランジスタ T_{u+} はすぐにはオンとならず、デッドタイム経過した後の領域cにおいて、初めてオンとなる(図7の G_{u+})。従って、U相電流も領域cで流れ始める。デッドタイムがない場合に比べて、領域bの分(図7 V_u のハッキング部分)だけ順方向電圧が不足したことになる。

【0058】領域dにおいて、 G_{v-} 、 G_{w-} にハイの信号が出力されると、V、W相のシンク側のトランジスタ T_{v-} 、 T_{w-} はその瞬間にオフとなる(図7の G_{v-} 、 G_{w-})。この結果、U相とV、W相間には主電源に相当する電圧が印加されないようになるため、U相電流は先に述べた誘導起電力によって維持される。このとき、V、W相に流れ込んだ電流はそれぞれソース側トランジスタ T_{v+} 、 T_{w+} に並列に備えられたフライホイールダイオード D_{v+} 、 D_{w+} を経由して流れるのである。上位信号の出力からデッドタイム分だけ経過した後、V、W相のソース側トランジスタ T_{v+} 、 T_{w+} のゲート信号 G_{v+} 、 G_{w+} がハイとなるが(領域e)、引き続きフライホイールダイオード D_{v+} 、 D_{w+} を経由して電流が流れれる状態には変わりない。また、この状態は、再び、 G_{v-} 、 G_{w-} にローの信号が出力され(領域f)、V、W相のソース側のトランジスタ T_{v+} 、 T_{w+} のゲート信号 G_{v+} 、 G_{w+} がローとなつても変化しない。この信号の出力からデッドタイム経過して(領域g)、V、W相のシンク側のトランジスタ T_{v-} 、 T_{w-} がオンになると、U相には再び順方向電圧が印加されることになるため、電流値は増加する。つまり、デッドタイムがない場合に比べて、領域fの分(図7 V_v 、 V_w のハッキング部分)だけ順方向電圧が不足したことになる。

【0059】その後、 G_u にローの信号が出力されると(領域h)、U相のソース側トランジスタ T_{u+} がオフとなり、誘導起電力によりU相電流が維持される。図7のU相電流のグラフに示す通り、デッドタイムがない場合(点線)に比べて、電流値(実線)は低い値となっている。

【0060】次に逆方向電圧が印加された場合について説明する。 G_{v-} 、 G_{w-} にハイの信号が出力されると(領域j)、図7に示す通り、V、W相のシンク側トランジスタ G_{v-} 、 G_{w-} はその瞬間にオフとなる。この結果、電流はU相のシンク側トランジスタ T_{u-} に並列に設けられたフライホイールダイオード D_{u-} を経由して主電源のシンク側から流れ出した電流は、V、W相のソース側トランジスタ T_{v+} 、 T_{w+} に並列に設けられたフライホイールダイオード D_{v+} 、 D_{w+} を経由して主電源のソース側に流れ込むようになる。従って、V、W相のソース側トランジスタ T_{v+} 、 T_{w+} がオンになっていない状態でも、U相には逆方向電圧が印加された状態

となり、電流値は減少していく。上記信号の出力からデッドタイム分だけ経過した後、V、W相のソース側トランジスタ T_{v+} 、 T_{w+} がオンとなつても(領域k)、この状態に変わりはない。

【0061】その後、 G_u にハイの信号が出力されると(領域l)、その瞬間にU相のシンク側トランジスタ T_{u-} がオフとなる。しかし、上述の通り、U相電流は既にU相のシンク側トランジスタ T_{u-} に並列に設けられたフライホイールダイオード D_{u-} を経由して流れている。シンク側トランジスタ T_{u-} がオフとなつてもこの状態は変わらず、電流は減少し続ける。上記信号の出力からデッドタイム分だけ経過した後、U相のソース側トランジスタ T_{u+} がオンになると(領域m)、U、V、W相の電位差がなくなるため、誘導起電力によりU相電流が維持されるようになる。つまり、デッドタイムがない場合に比べて領域l(図7 V_u のハッキング)の分だけ順方向電圧が不足したことになる。

【0062】その後、 G_u にローの信号が出力されると(領域n)、領域lと同じ状態に戻るため、U相電流は再び減少する。この状態は、U相のシンク側トランジスタ T_{u-} のゲート信号 G_{u-} がハイとなつても(領域o)変化しない。なお、領域oにおいてU相電流は負の値となり、電流はV、W相から流出してU相に流れ込むようになる。従って、続いて G_{v-} 、 G_{w-} にローの信号が出力されると(領域p)、誘導起電力によりU相電流は維持される。図7のグラフから分かる通り、デッドタイムがない場合と異なり、逆方向電圧の印加が終了した時点でU相電流値は値0にならない。

【0063】以上に説明した通り、デッドタイムがある場合には、デッドタイムがない場合と電流の挙動が相違するため、領域h等において検出された電流値を単純に用いてインダクタンスひいては電気角を算出したのでは、誤差が含まれることになる。

【0064】(4) 本実施例の電気角検出装置の設計方法

本実施例における電気角検出装置の設計方法として、上記デッドタイムの影響を除去して電気角を精度良く検出する電気角検出装置の設計方法について説明する。最初に、デッドタイムによりU相電流値に生じる誤差について説明する。電圧が印加されている際の電流変化率(図7におけるU相電流のグラフの傾きに相当する)は、デッドタイムの有無により相違しない。従って、領域bの終了時点でデッドタイムの有無によりU相電流に生じる誤差を単位誤差 Δi とすると、図7の V_u または V_v 、 V_w 中に示したハッキング部分1カ所につき、 Δi ずつ電流値の誤差が増大していくことが分かる。図7の場合は、領域fの終了時点でデッドタイムがある場合の電流値はデッドタイムがない場合の電流値に比べて $2 \cdot \Delta i$ だけ低くなり、領域lの終了時点では、 $3 \cdot \Delta i$ だけ低くなる。また、単位誤差 Δi は、デッドタイムを d_t と

すると、先に述べた式(2)を用いて、 $\Delta i = E_1 \cdot d t / L$ と表すことができる。E_1はコイル巻線に印加される電圧値、Lはコイル巻線のインダクタンスを表している。

【0065】次に電流値を検出する2回のタイミングを設定する。本実施例では、後のインダクタンス算出に都合のよいタイミングを選択するものとし、第1の検出タイミングとして領域hにおいて電流値を検出する。第2の検出タイミングとして逆電圧の印加を終了したタイミングを選択し、領域pにおいて電流値を検出する。電流検出のタイミングは、これらのタイミングに限定されるものではなく、例えば、順方向電圧が印加されている途中に2回検出するものとしてもよいし、逆方向電圧が印加されている途中に2回検出するものとしてもよい。

【0066】上記タイミングで電流を検出する場合、第1の検出タイミングすなわち領域hにおいて検出した電流値をa_1、第2の検出タイミングすなわち領域pにおいて検出した電流値をa_2とし、各タイミングにおいてデッドタイムが存在しない場合に検出されるべき電流値(以下、理想値と呼ぶ)をそれぞれA_1、A_2とする。先に述べた単位誤差 Δi を用いて表される次式(3)の関係が成立する。

$$a_1 = A_1 - n \cdot \Delta i$$

$$a_2 = A_2 - m \cdot \Delta i \quad \dots \quad (3)$$

ここで、nは、巻線への電圧の印加を開始すべき制御信

$$A_1 = E_1 \cdot t_1 / L$$

$$A_2 = A_1 - E_1 \cdot t_2 / L$$

$$= A_1 (1 - t_2 / (t_1 + L)) \quad \dots \quad (4)$$

ここで、E_1はコイル巻線に印加される電圧の絶対値であり、Lはコイル巻線のインダクタンスである。また、t_1は順方向電圧印加状態を生じるような制御信号が出力されている時間であり、t_2は逆方向電圧状態を生じるような制御信号が出力されている時間である。図7に基づいて具体的に説明すれば、t_1は領域b～領域gまでの時間ではなく、これらの時間から領域d、eの時間を引いた分に相当する時間である。また、t_2は領域j～領域oまでの時間から領域l、mの時間を引いた分に相当する時間である。なお、図7から分かる通り、本実

$$A_1 = (m \cdot a_1 - n \cdot a_2)$$

$$/ (m - n + n \cdot t_2 / t_1) \quad \dots \quad (5)$$

また、上記連立方程式(3)、(4)によれば、コイル巻線のインダクタンスLを次式(6)の形で直接求める

$$L = E_1 \cdot t_1 / A_1$$

$$= E_1 \cdot t_1 \cdot (m - n + n \cdot t_2 / t_1)$$

$$/ (m \cdot a_1 - n \cdot a_2) \quad \dots \quad (6)$$

従って、インダクタンスを算出する際に、先に述べた式(2)に代えて、検出された電流値a_1、a_2を用いた上式(6)を用いるものとすれば、デッドタイムの影響なくインダクタンスを算出することができる。この結果に基づいて、インダクタンスと電気角の関係を記憶し

号の出力(領域b)から第1の検出タイミング(領域h)までに、U相のソース側のトランジスタTu+をオンにする回数(例えば、領域c)と、U相からV、W相へ流れる順方向電流が流れている状態においてV、W相のソース側のトランジスタTv+、Tw+をオフにする回数(例えば、領域f)との総計である。本実施例では、図7に示す通り、n=2となる。領域d、eにおけるGu、Gwへのハイの信号入力がなければn=1となる。また、Gu、Gwへのハイの信号入力が2回以上行われる場合には、その回数に応じてn≥3となる。一方、mは、巻線への電圧の印加を開始すべき制御信号の出力(領域b)から第2の検出タイミング(領域p)までに前記スイッチングが行われる回数の総計である。本実施例では、図7に示す通り、領域b、f、lが上記スイッチングに該当するため、m=3となる。領域pでは、V、W相のソース側トランジスタTv+、Tw+がオフとなっているが、U相電流が順方向に流れていないと、上記スイッチングには該当しない。なお、領域l、mにおけるGuへのハイの信号入力がなければm=nとなる。また、Guへのハイの信号入力が2回以上行われる場合には、その回数に応じてm≥3となる。

【0067】領域h、pにおける電流の理想値A_1、A_2については、先に示した式(2)に基づいて、それ次の関係式(4)が成立する。

施例ではA_2=0である。

【0068】上式(3)、(4)における未知数は、A_1、A_2、L、 Δi の4つである。その他の諸量は、電流の検出値a_1、a_2およびGu、Gv、Gwの信号パターンから決定される値n、m、t_1、t_2、E_1であるため既知である。従って、式(3)～(4)中の4つの式を連立方程式として解けば、上記4つの未知数を一義的に算出することができる。インダクタンスの算出に最も重要となる電流値A_1について、算出結果を示せば次式(5)となる。

$$A_1 = (m \cdot a_1 - n \cdot a_2) / (m - n + n \cdot t_2 / t_1) \quad \dots \quad (5)$$

ことができる。

たテーブルを参照するものとすれば、電気角をデッドタイムの影響なく検出できる電気角検出装置を設計することができます。

【0069】上式(4)において、第2の検出タイミングにおける電流の理想値A_2は、第1の検出タイミング

における電流の理想値 A_1 の関数として与えられる。該関数を $F(A_1)$ とすれば、本実施例においては、

$$F(A_1) = A_1 (1 - t_2 / (t_1 \cdot L))$$

である。この関数 $F(A_1)$ は、電流を検出する第1および第2のタイミングに応じて、種々定め得るものである。例えば、第1の検出タイミングを順方向電圧の印加中とし、第2の検出タイミングを順方向電圧の印加を終了した時とすると、

$$F(A_1) = A_1 (1 + t_2 / (t_1 \cdot L))$$

となる。また、 $A_1 = V \cdot t_1 / L$ なる関係があるから、上記関数 $F(A_1)$ から V 、 L を消去した形とすることもできる。 $F(A_1)$ がどのような形式の関数であっても、上式(3)、(4)を連立させることにより、電流の理想値 A_1 を一義的に算出することができる。

【0070】以上説明した設計方法においては、電流値を検出するものとしているが、その他電流の変化量を検出するものとしてもよい。例えば、順方向電圧を印加する前後における電流の変化量 Δa_1 (図7の領域aから

$$\begin{aligned} \Delta A_1 &= (k \cdot \Delta a_1 - n \cdot \Delta a_2) \\ &\quad / (k + n \cdot t_2 / t_1) \\ L &= E_1 \cdot t_1 / \Delta A_1 \\ &= E_1 \cdot t_1 \cdot (k + n \cdot t_2 / t_1) \\ &\quad / (k \cdot \Delta a_1 - n \cdot \Delta a_2) \end{aligned} \quad \dots (8)$$

従って、インダクタンスを算出する際に、上式(5)、(6)に代えて、上式(8)を用いるものとしても、デッドタイムの影受けずにインダクタンスを算出することができる。この結果に基づいて、インダクタンスと電気角の関係を記憶したテーブルを参照するものとすれば、電気角をデッドタイムの影響なく検出できる電気角検出装置を設計することができる。

【0071】(5) 電気角検出装置の処理内容

上で述べた設計方法により設計された本実施例における電気角検出ルーチンについて図8を用いて説明する。図8に示した電気角検出ルーチンは、制御用ECU100に備えられたCPU120が実行するルーチンである。

【0072】電気角検出ルーチンが開始されると、CPU120は、まず初期電流値 a_0 の検出を行う(ステップS100)。具体的には、U相に流れる電流値に応じて電流センサ102から出力される信号をフィルタ106およびADC112を介して入力ポート116より読み込むのである。次にCPU120は、順方向電圧の印加を開始する(ステップS105)。具体的には、電圧印加部130に対し、U相電圧を制御する信号 G_u にハイの信号を出力する。電圧を印加するパターンは、図7に示した通りである。この結果、U相には、図7のグラフの領域cに示した通り、電流が流れ始める。

【0073】CPU120は、この後、サンプリングタイムが経過するのを待つ(ステップS110)。サンプリングタイムは、図7の領域b～領域gまでの時間に相当する。フローチャートには示していないが、図7に示

領域hまでの電流の変化量)と、逆方向電圧を印加する前後における電流の変化量 Δa_2 (図7の領域iから領域pまでの電流変化量)を検出するものとしてもよい。このとき、それぞれの電流の変化量の理想値を ΔA_1 、 ΔA_2 とすると、上式(3)、(4)に代えて、次式(7)が成立する。

$$\Delta a_1 = \Delta A_1 - n \cdot \Delta i$$

$$\Delta a_2 = \Delta A_2 - k \cdot \Delta i$$

$$\Delta A_1 = E_1 \cdot t_1 / L$$

$$\Delta A_2 = -E_1 \cdot t_2 / L \quad \dots (7)$$

ここで、 k は電流の変化量 Δa_2 を検出する期間において、U相のソース側のスイッチング素子をオンにする回数およびV、W相以外の相のソース側のスイッチング素子をオフにする回数の総計であり、先に示した n 、 m を用いて表せば $k = m - n$ である。この場合も、上式(7)を連立方程式として解くことにより、電流変化量の理想値 ΔA_1 、 ΔA_2 およびインダクタンス L を次式(8)の通り、一義的に算出することができる。

すように、V、W相に平均電圧を制御するための電圧パルスを出力するものとしてもよい。実際には、CPU120は、モータ40の種々の制御ルーチンに合わせて定期的に割り込み処理をかけることにより、電気角検出ルーチンを実行している。従って、ここにいうサンプリングタイムとは、この割り込み間隔の整数倍で表されるタイミングである。なお、本実施例では、一定の時間が経過した時点で割り込み処理をかけるものとしているが、順方向電圧の印加開始から後で説明する電流検出までの経過時間が特定できるものであれば、1パッケージのあるタスクが終了したタイミング等必ずしも一定の時間間隔とはならないタイミングをサンプリングタイムとしてもよい。

【0074】サンプリングタイムが経過した後、CPU120は電流値 a_1 を検出し、順方向電圧の印加を停止する(ステップS115)。電流値の検出と、電圧の印加停止はいずれが先であっても構わない。また、図7に示す通り、電圧の印加を停止してもしばらく電流値は維持されるため、電圧の印加を停止してから電流が減衰しない程度の期間経過した後に電流値 a_1 を検出するものとしてもよい。こうしてステップS100およびS115において検出された電流値 a_0 、 a_1 により、順方向電圧を印加する前後の電流変化量 $\Delta a_1 (= a_1 - a_0)$ を算出することができる。

【0075】次のステップで、CPU120はU相に逆方向の電圧を印加する(ステップS120)。具体的には、電圧印加部130に対し、 G_u にローの信号を出力

し、 G_v , G_w にハイの信号を出力する。逆方向電圧の印加は、順方向電圧の印加停止後、U相電流が減衰しない程度の時間を開けて開始される。この時間は、電気角検出処理に要する時間を短縮する観点から短い程好ましいため、ステップS115における電流値 a_1 の検出が順方向電圧の印加停止と同時に見える場合には、その後から逆方向電圧を印加するものとしてもよい。図7のU相電流のグラフ(領域j)に示した通り、逆方向電圧の印加の開始とともにU相電流は減少していく。

【0076】逆方向電圧の印加を開始した後、CPU120は、サンプリングタイムの経過を待つ(ステップS125)。フローチャートには示していないが、図7に示すように、U相に平均電圧を制御するための電圧パルスを出力するものとしてもよい。サンプリングタイムは、ステップS110と同様、CPU120が割り込み処理を行う間隔の整数倍で表されるタイミングである。本実施例では、後の計算の容易のため、ステップS110とS125におけるサンプリングタイムは同一の時間に設定してあるが、両者は異なるものとしてもよい。

【0077】サンプリングタイムが経過した時点で、CPU120は電流値 a_2 を検出し、逆方向電圧の印加を停止する(ステップS130)。電流値の検出タイミングと、電圧の印加停止タイミングの関係は、ステップS115の説明で述べた種々の関係を探りうる。こうしてステップS115およびS130において検出された電流値 a_1 , a_2 により、逆方向電圧を印加する前後の電流変化量 Δa_2 (= $a_2 - a_1$)を算出することができる。電流変化量 Δa_2 はこの場合、負の値となる。

【0078】次に、CPU120は検出された電流変化量 Δa_1 , Δa_2 を用いて電流変化量の理想値 ΔA_1 を算出する(ステップS135)。電流変化量の理想値 ΔA_1 は、上式(8)に $n=2$, $k=1$, $t_2=t_1$ を代入して得られる次式(9)に基づいて算出される。

$$\Delta A_1 = (\Delta a_1 - 2\Delta a_2) / 3 \quad \dots \quad (9)$$

CPU120は、この結果を用いて電気角を算出する(ステップS140)。つまり、先に説明した式(2)を用いてインダクタンス L を算出し、電気角とインダクタンスを記憶したテーブルを参照することによって電気角を求めるのである。こうして電気角を算出したところで、CPU120は電気角検出ルーチンを一終了する。

【0079】なお、電気角とインダクタンスを記憶したテーブルの形式によっては、U相電流を検出しただけでは、電気角が $0 \sim 2\pi$ の範囲で一義的に求まらない場合もある。かかる場合には、図7に示した電気角検出ルーチンをV相についても実行することにより電気角を検出し、U相電流に基づく電気角の検出結果とV相電流に基づく電気角の検出結果とを比較すれば、電気角を $0 \sim 2\pi$ の範囲で一義的に求めることができる。

【0080】以上に示した実施例によれば、デッドタイムの影響を除去して電気角を精度よく検出することができる。

かかる。実際に本実施例による電気角検出装置により電気角を検出した実験結果を図9に示す。図9は、モータ40の回転子50がゆっくりと回転している場合において、時間を横軸にとり、電気角を縦軸にとって、従来の電気角検出装置により電気角を検出した結果を示している。図9に実線で表したこぎり刃状のグラフが検出された電気角を表している。電気角は0度から360度まで徐々に増大し、360度に達すると値は不連続的に0度になるため、このようなこぎり刃状のグラフとなるのである。なお、実験装置としてのモータ40は厳密には一定の角速度で回転していないため、電気角は直線的に増加する訳ではない。図9に点線で示したグラフは回転角センサにより検出された電気角と電気角の真値との誤差を表している。誤差は、図9中の横軸を0とし、検出された電気角の方が真値よりも大きい場合には正の値として、小さい場合には負の値として表されている。従来の電気角検出装置による電気角の検出誤差範囲は、図9に示した通り、大きい値となっていることが分かる。

【0081】次に同様の実験結果を本実施例の電気角検出装置について示したものが、図10のグラフである。図10に示す通り、本実施例の電気角検出装置により検出された電気角の検出誤差範囲は、図9に示した誤差範囲に比べて半分以下の値に激減していることが分かる。このように本実施例における電気角検出装置によれば、デッドタイムの影響を受けずに非常に精度良く電気角を検出することができる。

【0082】また、本実施例では、2回のタイミングで検出された電流変化量に基づいて、電流変化量の理想値 ΔA_1 を算出している(ステップS135)。つまり、デッドタイムに応じて制御用ECU100から電圧印加部30への信号出力を変化させる等の複雑な制御をすることなく、容易にデッドタイムの影響を除去することができる。しかも、電流変化量の理想値の算出式(9)は、デッドタイム自身に依存する形ではないため、電圧印加部130のインターフェース部136を構成する素子のバラツキ、温度変化および経年変化等によりデッドタイムの長さが変化しても、その影響を受けずに安定して精度良く電気角を検出することができる。さらに、電流変化量に基づいて電気角を算出するものとしているため、電気角検出時に微少な電流がU相に流れている場合や、温度ドリフト等により電流センサ102に検出誤差が生じている場合等、初期電流値 a_0 が値0になっていない場合であっても精度良く電気角を検出することができる利点もある。

【0083】なお、上述の実施例においては、ステップS135において一旦、電流変化量の理想値 ΔA_1 を求めてから、次のステップS140で電気角を算出するものとしている。かかる方法を採用することにより、従来の電気角検出装置における電気角検出ルーチンの先頭に図8のステップS100～S135に相当する処理を付

加するだけで容易に本実施例の電気角検出装置を実現することができる。

【0084】一方、上式(8)にn=2, k=1, t2

$$L = 3 \cdot E_1 \cdot t_1 / (\Delta a_1 - 2 \Delta a_2) \quad \dots \quad (10)$$

この場合、従来の電気角検出装置における電気角検出ルーチンについてコイル巻線のインダクタンスを算出する部分を上式(10)に変更する必要が生じるが、上の実施例による電気角検出ルーチンよりもシンプルな構成で電気角を検出することができるようになり、電気角検出の処理速度を向上できる。

【0085】また、上記実施例においては、電流の変化量に基づいて電気角を算出しているが、電流値に基づいて電気角を算出するものとしてもよい。このような電気角検出装置では、図8のフローチャートにおいて初期電

$$L = 3 \cdot E_1 \cdot t_1 / (3 \cdot a_1 - 2 \cdot a_2) \quad \dots \quad (12)$$

このような電気角検出装置によれば、デッドタイムの影響を受けずに精度よく電気角を検出することはもちろん、先に述べた実施例に比較して電気角検出ルーチンにおける演算量を減らすことができ、処理時間の短縮を図ることができる。従って、初期電流値a0が値0となることが保障されている場合には、かかる態様による電気角検出装置が有効となる。

【0086】以上、本発明の種々の実施例について説明してきたが、本発明はこれらに限定されるものではなく、その要旨を逸脱しない範囲で、種々の形態による実施が可能である。

【図面の簡単な説明】

【図1】モータ制御装置10の概略構成を示すブロック図である。

【図2】三相同期モータ40の概略構成を示す説明図である。

【図3】三相同期モータ40の固定子30と回転子50との関係を示す端面図である。

【図4】三相同期モータ40の等価回路図である。

【図5】電圧印加部130の構成を示す回路図である。

【図6】コイル巻線の電圧および電流の様子を示すグラフである。

【図7】U相に印加される電圧およびU相電流の様子を示すグラフである。

【図8】電気角検出ルーチンの流れを示すフローチャートである。

【図9】従来の電気角検出装置による電気角検出結果を比較したグラフである。

【図10】本実施例の電気角検出装置による電気角検出結果を比較したグラフである。

【符号の説明】

= t1を代入して得られる次式(10)により、コイル巻線のインダクタンスLを直接算出するものとしてもよい。

$$A_1 = (3 \cdot a_1 - 2 \cdot a_2) / 3 \quad \dots \quad (11)$$

流値a0の検出(ステップS100)が不要となる。また、検出された電流値a1, a2に基づいて電流変化量△a1, △a2を算出する演算も不要となる。ステップS135では、式(5)にn=2, m=3, t1=t2を代入して得られる次式(11)に基づいて、電流の理想値A1を算出するものとすればよい。

$$A_1 = (3 \cdot a_1 - 2 \cdot a_2) / 3 \quad \dots \quad (11)$$

また、式(6)にそれぞれ値を代入して、コイル巻線のインダクタンスLを次式(12)の形で直接求めるものとしてもよい。

$$L = 3 \cdot E_1 \cdot t_1 / (3 \cdot a_1 - 2 \cdot a_2) \quad \dots \quad (12)$$

10…モータ制御装置

20…板状固定子

22…ティース

24…スロット

30…固定子

32…コイル

34…ボルト

36…ボルト孔

40…三相同期モータ

50…回転子

51, 52, 53, 54…永久磁石

55…回転軸

57…板状回転子

60…ケース

61, 62…軸受

71, 72, 73, 74…突極

100…制御用ECU

102, 103, 104…電流センサ

106, 107, 108…フィルタ

112, 113, 114…ADC

116…入力ポート

118…出力ポート

120…CPU

122…ROM

124…RAM

126…クロック

130…電圧印加部

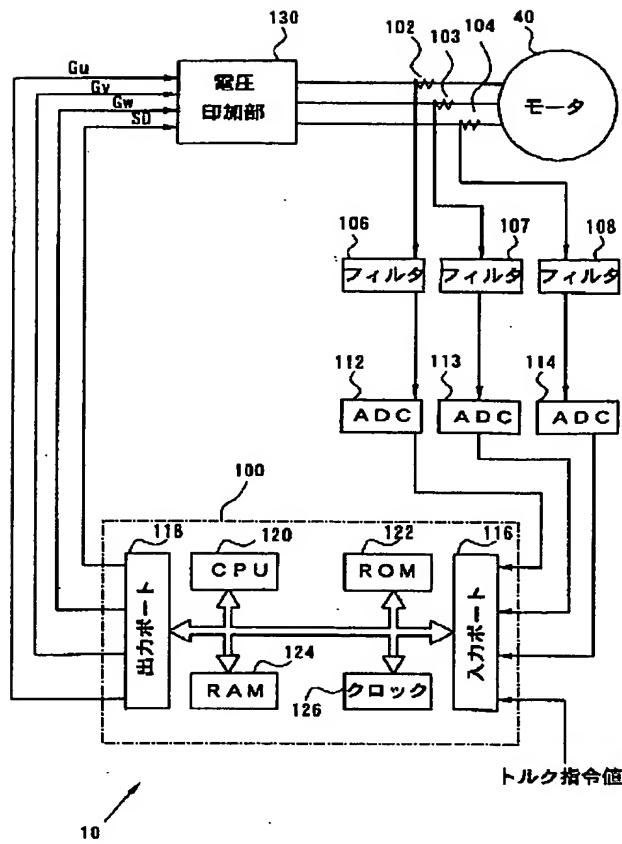
132…ソース側プリドライブ回路

134…シンク側プリドライブ回路

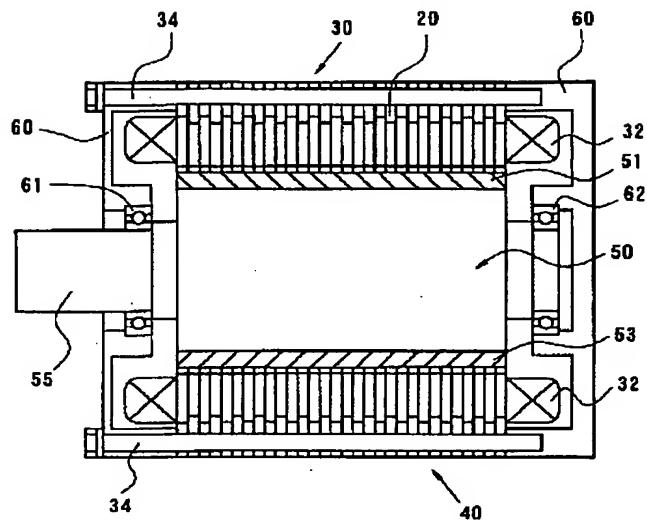
136…インタフェース部

138…トランジスタインバータ

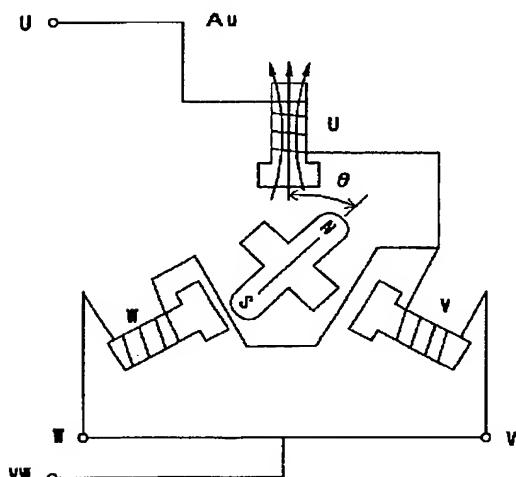
【図1】



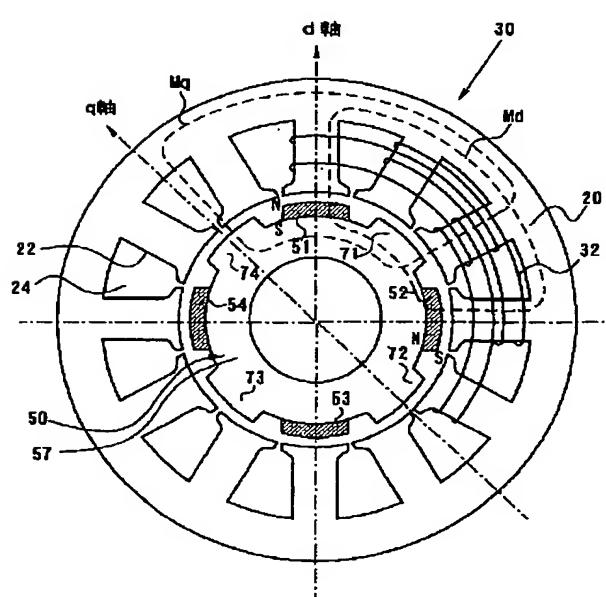
【図2】



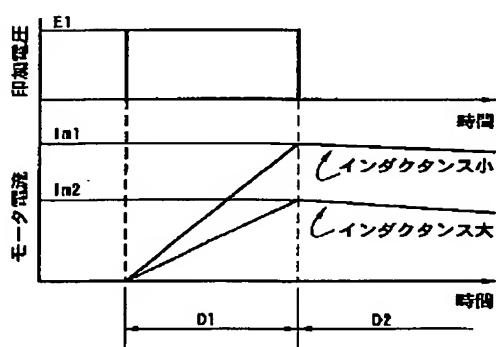
【図4】



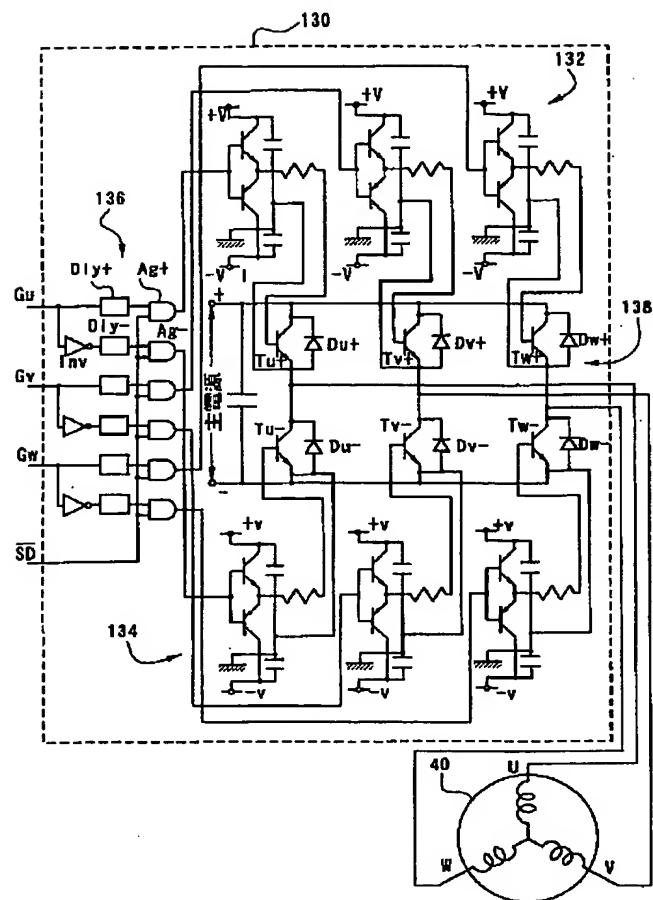
【図3】



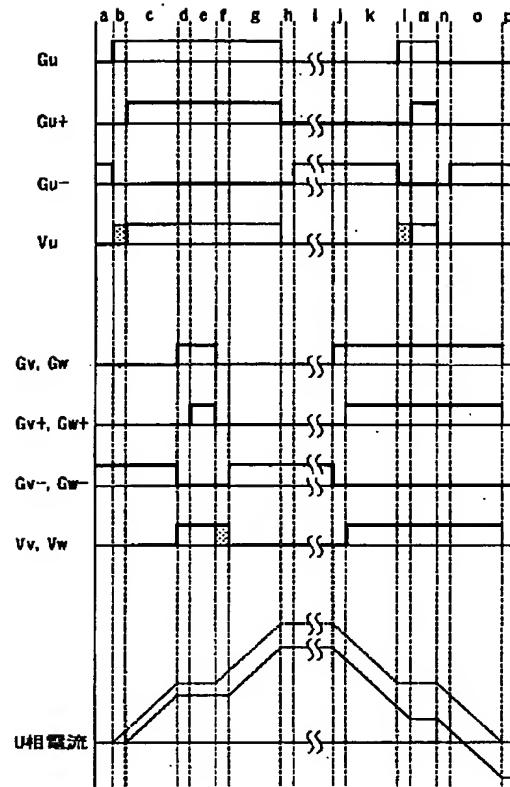
【図6】



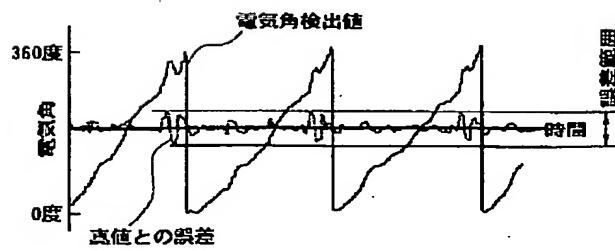
【図5】



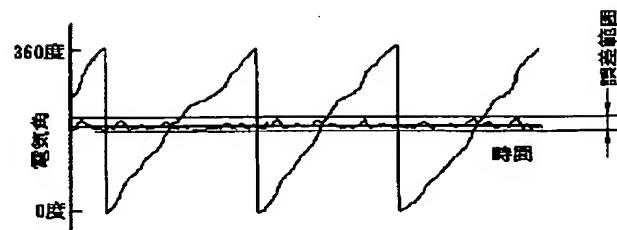
【図7】



【図9】



【図10】



【図8】

